

基于 $P-\epsilon-N$ 曲线整体推断的涡轮盘寿命可靠性分析*

高 阳, 白广忱

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 疲劳寿命符合对数正态分布, 并且对数寿命的标准差随弹性应变幅和塑性应变幅的减小而增大。采用基于异方差回归分析的整体推断方法在现有低循环疲劳试验数据的基础上, 得到了航空发动机涡轮盘材料 GH4133 在温度 250℃ 下的 $P-\epsilon-N$ 曲线; 利用 $P-\epsilon-N$ 曲线对某涡轮盘进行低循环疲劳寿命可靠性分析, 得到置信度 0.95 可靠度 0.998 7 的轮盘寿命为 1 866 次循环, 合 683 飞行小时, 与涡轮盘疲劳试验分析得到的技术寿命接近。整体推断得到的 $P-\epsilon-N$ 曲线精度较高, 利用 $P-\epsilon-N$ 曲线进行轮盘寿命可靠性设计分析具有计算简便、节约试验成本的优点。

关键词: 涡轮盘; 低循环疲劳; 异方差回归分析; 应变-寿命曲线; 置信度; 可靠性

中图分类号: V231.95 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2009) 03-0347-05

Estimation of LCF life for a turbine disk based on $P-\epsilon-N$ curves

GAO Yang BA I Guang-chen

(Coll. of Energy and Power Engineering, Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract The fatigue life follows log-normal distribution and the standard deviation of logarithmic life increases with reducing elasticity and plasticity strain. The $P-\epsilon-N$ curves of turbine disk material GH4133 in temperature of 250℃ was obtained by the integral estimation method based on heteroscedastic regression analysis of the low cycle fatigue (LCF) test data. The reliability analysis of LCF life for a turbine disk was completed by these $P-\epsilon-N$ curves. The fatigue life with confidence of 0.95 and reliability of 0.998 7 was 1 866 cycles, and it was converted into 683 hours of flight, which fitted well with the technical life based on real turbine disks fatigue test estimation. The precision of the $P-\epsilon-N$ curve obtained by the integral estimation was good enough. The fatigue reliability design and analysis of turbine disks based on $P-\epsilon-N$ curves was simple in computation and could save the cost of fatigue tests.

Key words Turbine disk; Low cycle fatigue; Heteroscedastic regression analysis; Strain-life curve; Confidence; Reliability

1 引 言

基于可靠度 (存活概率) P 的 $P-\epsilon-N$ 曲线反映了材料低循环疲劳 (LCF) 寿命的概率分布特性。我国航空发动机涡轮盘寿命可靠性分析就是在材料 $P-\epsilon-N$ 曲线的基础上进行的。在 $P-\epsilon-N$ 曲线的测定中, 由于在某一恒定应变水平 $\Delta\epsilon_i$ 下进行一组疲劳试验时, 弹性应变分量 $\Delta\epsilon_e$ 和塑性应变分量 $\Delta\epsilon_p$ 都呈随机变化, 不能得到成组的 $\Delta\epsilon_e$ 和 $\Delta\epsilon_p$ 下的试验数据, 试验数据为散点数据, 从而无法通过成组法得到 $P-\epsilon-N$ 曲线。并且有研究表明对数疲劳寿命的标准差随对数

弹性应变分量和对数塑性应变分量的减小而线性增大^[1,2], 由线性异方差回归分析^[2]给出了 $P-\epsilon-N$ 曲线的整体推断方法, 这一方法将不同应变水平下的寿命试验数据作为一个整体进行统计分析, 能够实现 $P-\epsilon-N$ 曲线的小子样测定, 提高精度的同时能够节约疲劳试验试件, 具有显著的工程意义。

由于疲劳试验的昂贵费用, 我国航空发动机用材料的疲劳试验普遍样本不足, 每个应变水平下的试件个数少则 1~2 个^[3], 多的也不过 5~7 个^[4], 并且现有数据存在散点特性, 因此很难通过常规方法得到满意的 $P-\epsilon-N$ 曲线。本文在涡轮盘材料 GH4133 现有

* 收稿日期: 2008-04-20 修订日期: 2008-09-24

作者简介: 高 阳 (1979—), 男, 博士生, 研究领域为发动机结构疲劳可靠性、机构仿真及可靠性研究。

E-mail: buaagy@sina.com

低循环疲劳试验数据的基础上,采用异方差回归分析对 P - ϵN 曲线进行了整体推断,得到了 250 °C 下一定置信度水平的 P - ϵN 曲线族;并根据得到 P - ϵN 曲线对某发动机高压涡轮盘进行了低循环疲劳寿命可靠性分析,得到置信度为 0.95 可靠度为 0.998 7 的涡轮盘的寿命为 1 866 次循环,合 683 飞行小时;与真实涡轮盘疲劳试验分析得到的技术寿命^[5]较为接近,二者均大于按照英国国防标准《航空燃气涡轮发动机通用规范》DEF STAN 00-971(简称 00-971)所给出的分散系数得到的技术寿命。

本文验证了基于线性异方差回归分析的 P - ϵN 曲线整体推断方法的有效性,由现有材料疲劳试验数据得到的 P - ϵN 曲线精度较高,分析得到的涡轮盘可靠性寿命既能较大的挖掘轮盘的寿命潜力,又具备高的安全性,能够为航空发动机涡轮盘的疲劳可靠性设计分析、寿命评估提供依据。尤其在涡轮盘设计阶段或进行寿命预估时,通过 P - ϵN 曲线进行疲劳寿命可靠性计算简单易行、节约计算和试验成本。

2 P - ϵN 曲线的整体推断方法^[1,2]

在低循环疲劳寿命分析中 Mason-Coffin 公式的应用最为广泛,其核心是在双对数坐标内,疲劳寿命分别与弹性应变幅和塑性应变幅呈线性关系,对数坐标中弹、塑性线可分别表示为

$$\lg(2N_f) = \frac{1}{b} \lg\left(\frac{\Delta \epsilon_e}{2}\right) - \frac{1}{b} \lg\left(\frac{\sigma'_f}{E}\right) \quad (1)$$

$$\lg(2N_f) = \frac{1}{c} \lg\left(\frac{\Delta \epsilon_p}{2}\right) - \frac{1}{c} \lg(\epsilon'_f) \quad (2)$$

令 $y_e = \lg(2N_f)$, $x_e = \lg(\Delta \epsilon_e/2)$, $a_e = -\lg(\sigma'_f/E)/b$, $b_e = 1/b$ 可得弹性线的标准线性方程

$$y_e = a_e + b_e x_e \quad (3)$$

同样令 $y_p = \lg(2N_f)$, $x_p = \lg(\Delta \epsilon_p/2)$, $a_p = -\lg(\epsilon'_f)/c$, $b_p = 1/c$ 可得到塑性线的标准线性方程

$$y_p = a_p + b_p x_p \quad (4)$$

大量疲劳试验数据显示对数寿命 y_e , y_p 的分散性随 $\Delta \epsilon_e$ 和 $\Delta \epsilon_p$ 的减小而增大;理论上也可以证明对数寿命的标准差随对数弹性应变分量和对数塑性应变分量呈线性变化,因此 σ_e 和 σ_p 可表示为^[1]

$$\sigma_e(x_e) = \sigma_{e0}[1 + \theta_e(x_e - x_{e0})] \quad (5)$$

$$\sigma_p(x_p) = \sigma_{p0}[1 + \theta_p(x_p - x_{p0})] \quad (6)$$

式中 σ_{e0} , σ_{p0} 分别表示对数寿命 y_e , y_p 在对数应变分量 x_{e0} , x_{p0} 处的标准差; θ_e , θ_p 分别表示 σ_e , σ_p 线性变化的斜率。

2.1 线性异方差回归分析^[2]

由于弹性线和塑性线具有相同均值和标准差表达式,这里统一介绍线性异方差回归分析方法,对于

$$y = a + bx + u, u \sim N[0, \sigma(x)] \quad (7)$$

$$\sigma(x) = \sigma_0[1 + \theta(x - x_0)] \quad (8)$$

式中 a , b , σ_0 , θ , x_0 是待定参数。假设 n 次独立试验得到的样本为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , ..., (x_n, y_n) , 则 a , b , σ_0 , θ 的估计量可由以下公式计算得到

$$\hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x} \quad (9)$$

$$\hat{b} = \frac{l_{xy}}{l_{xx}} \quad (10)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{1}{v} \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{a} - \hat{b}x_i)^2}{I^2(x_{\hat{b}} \theta)}} \quad (11)$$

$$E(\theta) = l_{yy\theta} + \frac{l_{xy}^2}{l_{xx}^2} l_{xx\theta} - 2 \frac{l_{xy}}{l_{xx}} l_{xy\theta} = 0 \quad (12)$$

式中 v 为方差的自由度,当 $\theta = 0$ $v = n - 2$ 即退化成同方差情况;当 $\theta \neq 0$ $v = n - 3$ 。其它过程参量如下:

$$x_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

$$I(x_{\hat{b}} \theta) = 1 + \theta(x_i - x_0) \quad (14)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{I^2(x_{\hat{b}} \theta)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{I^2(x_{\hat{b}} \theta)}} \quad (15)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{y_i}{I^2(x_{\hat{b}} \theta)}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{I^2(x_{\hat{b}} \theta)}} \quad (16)$$

$$l_{xx} = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{I^2(x_{\hat{b}} \theta)} \quad (17)$$

$$l_{yy} = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2}{I^2(x_{\hat{b}} \theta)} \quad (18)$$

$$l_{xy} = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{I^2(x_{\hat{b}} \theta)} \quad (19)$$

$$l_{xx\theta} = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2(x_i - x_0)}{I^3(x_{\hat{b}} \theta)} \quad (20)$$

$$l_{yy\theta} = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y})^2(y_i - y_0)}{I^3(x_{\hat{b}} \theta)} \quad (21)$$

$$l_{xy\theta} = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})(x_i - x_0)}{I^3(x_{\hat{b}} \theta)} \quad (22)$$

首先对式(12)迭代求解,设 θ 是 θ 的预估值,当 $\theta < \theta$ 时, $E(\theta) > 0$ 当 $\theta > \theta$ 时, $E(\theta) < 0$ 。又由于 θ

还满足

$$-1/(x_{\max} - x_0) < \theta \leq 0 \quad (23)$$

式中 $x_{\max}$ 是 x_i 中的最大值, 所以可以方便地采用二分法求得 θ 然后利用 θ 求解其它待定参量。

2.2 P - εN 曲线推断

对于低循环疲劳寿命, 工程上通常只关心其下百分位值的单侧置信下限, 即可靠度大于 0.5 的情况。根据文献 [2], 对应置信度 γ 可靠度 P 的对数寿命由下式给出

$$y_{P_Y} = \hat{a}_0 + \hat{b}_0 x - u_Y c_0 \sigma_0 \sqrt{c_1 x^2 + c_2 x + c_3} \quad (24)$$

其中非线性项与线性项相比, 通常是一个小量, 所以通过泰勒展开可以得到其线性公式^[1]

$$y_{P_Y} = a_{P_Y} + b_{P_Y} x \quad (25)$$

$$a_{P_Y} = \hat{a} + c_0 \sigma_0 (1 - \theta x_0) u_P - \frac{u_Y c_0 \sigma_0 (c_2 x + 2c_3)}{2 \sqrt{c_1 x^2 + c_2 x + c_3}} \quad (26)$$

$$b_{P_Y} = \hat{b} + c_0 \sigma_0 \theta u_P - \frac{u_Y c_0 \sigma_0 (2c_1 x + c_2)}{2 \sqrt{c_1 x^2 + c_2 x + c_3}} \quad (27)$$

式中 $y_{P_Y} = \lg(2N_{P_Y})$, $2N_{P_Y}$ 是对应置信度 γ 可靠度 P 的疲劳寿命。 u_P , u_Y 为标准正态偏量, 并且 $\Phi(u_P) = 1-P$ 和 $\Phi(u_Y) = \gamma$ $\Phi(\cdot)$ 为标准正态变量的分布函数。参数 c_0 , c_1 , c_2 , c_3 由下面公式给出

$$c_0 = \sqrt{\frac{2v-1}{2v-2}} \left(1 - \frac{u_Y^2}{w}\right)^{-1} \quad (28)$$

$$c_1 = \frac{\theta^2 u_P^2}{w} + \frac{1}{l_{xx}} \left(1 - \frac{u_Y^2}{w}\right) \quad (29)$$

$$c_2 = \frac{2\theta(1 - \theta x_0) u_P^2}{w} - \frac{2x}{l_{xx}} \left(1 - \frac{u_Y^2}{w}\right) \quad (30)$$

$$c_3 = \frac{(1 - \theta x_0)^2 u_P^2}{w} + \left[\frac{1}{\sum_{i=1}^n F^2(x_i - \theta)} + \frac{x^2}{l_{xx}} \right] \left(1 - \frac{u_Y^2}{w}\right) \quad (31)$$

$$w = 2(v + u_Y - 0.64 - \frac{1}{\sqrt{v + u_Y - 0.64}}) \quad (32)$$

对于疲劳寿命上百分位值的单侧置信上限, 即可靠度小于 0.5 的情况, 可取 $1.24 u_Y$ 替换式 (32) 中的常数 0.64 进行计算^[2]。

3 GH4133 疲劳试验数据处理

3.1 试验数据的异方差回归分析

某发动机高压涡轮盘材料为 GH4133 轮盘上开有 16 个径向销钉孔, 发动机正常工作时涡轮盘中心

孔和销钉孔温度保持在 250 °C 左右。应力分析显示销钉孔与中心孔相交的位置应力水平很高, 是涡轮盘的危险点。因此, 文献 [4] 有针对性的补充了 GH4133 材料 250 °C 的低循环疲劳试验, 每个应变水平下进行了 5 个试件的疲劳试验, 但是 $\Delta \varepsilon_i$ 并不完全相同, 由于材料为循环硬化材料, 稳定载荷寿命约处于总寿命的 10% ~ 95% 区间内, 取 40% ~ 60% 寿命区间内的迟滞回线为材料的稳态迟滞回线, 并对弹、塑性应变分量 $\Delta \varepsilon_e$ 和 $\Delta \varepsilon_p$ 进行了分离, 如表 1 所示。可以看出 $\Delta \varepsilon_e$ 和 $\Delta \varepsilon_p$ 更是呈随机变化, 因此, 如果采用常规方法不能获得材料的 P - εN 曲线, 而异方差回归分析方法能够很好的分析疲劳寿命的散点数据。

Table 1 LFC test data of GH4133

Specimens	$\Delta \varepsilon_i / 2$	$\Delta \varepsilon_e / 2$	$\Delta \varepsilon_p / 2$	$2N_f$
1	0.004 21	0.004 02	0.000 19	15 900
2	0.004 18	0.003 95	0.000 23	125 00
3	0.004 25	0.004 01	0.000 24	22 546
4	0.004 25	0.004 05	0.000 20	19 050
5	0.004 24	0.004 05	0.000 19	9 984
6	0.004 85	0.004 42	0.000 43	11 724
7	0.004 81	0.004 40	0.000 41	9 338
8	0.004 84	0.004 45	0.000 39	10 154
9	0.004 81	0.004 31	0.000 50	10 862
10	0.004 81	0.004 34	0.000 47	10 836
11	0.005 44	0.004 67	0.000 77	6 674
12	0.005 40	0.004 74	0.000 66	7 198
13	0.005 43	0.004 68	0.000 75	7 906
14	0.005 45	0.004 62	0.000 83	10 266
15	0.005 38	0.004 66	0.000 72	9 598
16	0.006 97	0.005 33	0.001 64	4 690
17	0.006 99	0.005 15	0.001 84	2 752
18	0.006 95	0.005 27	0.001 68	3 368
19	0.007 01	0.005 18	0.001 83	3 674
20	0.006 92	0.005 24	0.001 68	3 334

首先对表 1 数据进行线性异方差回归分析, 通过对式 (12) 迭代求解得到弹性线和塑性线的对数寿命线性变化的斜率 $\theta_e = -0.949 9$, $\theta_p = -0.353 6$ 然后分别代入式 (9) ~ (11) 得到弹性线和塑性线的标准线性方程和对数寿命的标准差线性函数 $\sigma_e(x_e)$ 和 $\sigma_p(x_p)$ 。

$$y_e = -8.969 6 - 5.503 8 x_e \quad (33)$$

$$y_p = 1.628 1 - 0.708 5 x_p \quad (34)$$

$$\sigma_e(x_e) = 0.105 7 [1 - 0.949 9(x_e + 2.341 5)] \quad (35)$$

$$\sigma_p(x_p) = 0.110\,5[1 - 0.353\,6(x_p + 3.232\,0)]$$

(36)

3.2 P-εN 曲线的推断

在得到弹性线和塑性线的标准线性方程和对数寿命标准差基础上,根据式(33)和式(34)计算得到了一定置信度 γ 可靠度 P 的弹、塑性线标准线性方程,并转为 Mason-Coffin 公式形式。如置信度 γ = 0.95 可靠度 P = 0.998 7 的寿命曲线表达式为

$$\frac{\Delta \epsilon_f}{2} = 0.021\,87(2N_f)^{-0.196\,3} + 1\,123.4(2N_f)^{-1.820\,1}$$

(37)

为了对比不同置信度和可靠度水平对 ε-N 曲线的影响,本文还针对置信度 γ 取 0.5 0.9 0.95 时,可靠度 P 取 0.5 0.9 0.99 0.998 7 分别计算了 P-εN 曲线的相关参数。把曲线参数 σ_f'/E, ε_f', b, c 作为随机变量,对应不同置信度和可靠度的参数取值如表 2 所示。

Table 2 Parameters of P-εN curves

γ	P	σ _f '/E	b	ε _f '	c
0.5	0.5	0.023 46	- 0.181 7	198.54	- 1.411 4
	0.9	0.023 02	- 0.186 0	318.66	- 1.518 7
	0.99	0.022 66	- 0.189 7	496.38	- 1.619 2
	0.998 7	0.022 42	- 0.192 2	681.92	- 1.691 3
0.9	0.5	0.023 16	- 0.181 7	179.09	- 1.411 4
	0.9	0.022 71	- 0.187 0	327.77	- 1.543 3
	0.99	0.022 30	- 0.191 9	613.22	- 1.680 8
	0.998 7	0.022 01	- 0.195 1	969.04	- 1.782 7
0.95	0.5	0.023 06	- 0.181 7	173.56	- 1.411 4
	0.9	0.022 61	- 0.187 4	334.14	- 1.553 3
	0.99	0.022 18	- 0.192 7	671.15	- 1.705 6
	0.998 7	0.021 87	- 0.196 3	1 123.4	- 1.820 1

对表 2 数据分析发现,对于 GH4133 材料,随着置信度或可靠度的提高,弹性线系数 σ_f'/E 和指数 b 都变小,而塑性线系数 ε_f' 变大、指数 c 变小;并且四个参数的变化程度并不一致,塑性线参数变化幅度明显大于弹性线参数,如置信度取 0.5 可靠度取值从 0.5 增大到 0.998 7 时,弹性线系数 σ_f'/E 减小了 4.4%,指数 b 减小了 5.8%,而塑性线系数 ε_f' 增大 343.5%,指数 c 减小 19.8%,表明在轮盘的疲劳寿命可靠性分析中如果将四个参数统一假设为正态随机变量,并取相同变异系数^[6 7],会导致较大的误差。

在图 1 中绘制了置信度为 0.95 时对应可靠度 P 为 0.5 0.9 0.99 0.998 7 的四条曲线,可以看出随

着可靠度提高寿命曲线向左下方移动,趋向于更安全;并且随着应变水平降低,由于寿命分散性的增大导致寿命曲线的横向间距变大。图 2 绘制了可靠度为 0.998 7,置信度 γ 为 0.5 0.9 0.95 的三条曲线,可以看出随着置信度提高,寿命曲线同样趋于更安全。

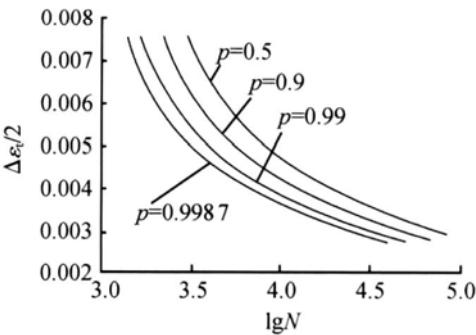


Fig. 1 P-ε-N curves with confidence of 0.95

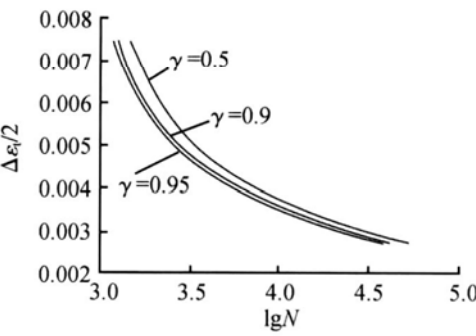


Fig. 2 ε-N curves with reliability of 0.998 7

4 涡轮盘低循环疲劳寿命估算

根据涡轮盘弹塑性有限元分析^[8],标准循环载荷谱下,径向销钉孔与轮盘中心孔相交位置为涡轮盘低循环疲劳危险点,其循环应变 Δε_f = 0.008 792,平均应力 σ_m = 310 MPa。以整体推断方法得到的 P-ε-N 曲线,结合 Morrow 法修正平均应力影响,对涡轮盘进行寿命可靠性分析,得到了不同置信度下轮盘危险点的技术寿命 N,并按照飞行换算率 η 为 2.73 循环 / 飞行小时^[7]给出了飞行小时数 H,如表 3 所示。可靠度水平保持不变时,置信度降低会带来技术寿命的提升,如可靠度取 0.998 7 时,置信度从 0.95 降低为 0.9 则轮盘技术寿命从 683 飞行小时提高到 743 飞行小时;同样,在相同置信度水平下,降低可靠度也可使轮盘技术寿命得到提升,如置信度取 0.95 可靠度 0.998 7 的技术寿命为 683 飞行小时,可靠度 0.99 的技术寿命为 868 飞行小时,可靠度 0.9 的技术寿命为 1249 飞行小时,说明在置信度 0.95 下,有 99.87% 的

盘的寿命超过 683 飞行小时, 99% 的盘的寿命超过 868 飞行小时, 更有 90% 的盘的寿命将超过 1 249 飞行小时, 即有很大一部份轮盘的实际使用寿命会远大于给出的技术寿命。

Table 3 Evaluation of LCF life for a turbine disk			
γ	P	N	H
0.5	0.5	5 651	2 069
	0.9	4 043	1 480
	0.99	3 076	1 126
	0.998 7	2 574	942
0.9	0.5	5 245	1 921
	0.9	3 566	1 306
	0.99	2 539	930
	0.998 7	2 031	743
0.95	0.5	5 119	1 875
	0.9	3 411	1 249
	0.99	2 372	868
	0.998 7	1 866	683

文献 [7] 根据不同温度下 GH 4133 材料的低循环疲劳试验数据, 推导了满足置信度 0.95 可靠度 0.9987 的寿命散度系数, 在真实涡轮盘低循环疲劳试验的基础上, 应用分散系数法对涡轮盘寿命进行评估, 得到置信度 0.95 可靠度 0.998 7 的技术寿命为 2 198 次循环, 合 805 飞行小时; 如果按照 00-971 标准所给出的分散系数得到相同置信度和可靠度的技术寿命为 1 432 次循环, 合 524 飞行小时; 而本文由 $P-\epsilon N$ 曲线计算得到的技术寿命 1 866 次循环, 合 683 飞行小时, 介于前两者之间, 能够较大程度挖掘轮盘的使用寿命同时具有较高的安全性。由于 00-971 是针对一般常规材料给出的寿命散度系数, 要照顾到在一定范围内适用的普遍性, 所以散度系数比较大, 给出的技术寿命偏小。本文与文献 [7] 结果更为接近相对误差为 15.1%。

以上分析表明, 由标准试件疲劳试验获得 $P-\epsilon N$ 曲线对涡轮盘低循环疲劳寿命进行估算满足一定精度要求, 并且简便易行、节省计算时间和试验成本, 尤其适用于设计阶段的轮盘寿命可靠性分析和技术寿命估算。鉴于本文是由仅有 20 个试件的试验数据得到 $P-\epsilon N$ 曲线, 可以预见如果能够适当增加材料的疲

劳试验数据, $P-\epsilon N$ 曲线对于概率寿命预测精度将进一步提高。

5 结 论

通过线性异方差回归分析方法对航空发动机涡轮盘材料 GH 4133 现有的低循环疲劳试验数据进行整体推断, 得到了 250 ℃ 下具有一定置信度水平的 $P-\epsilon N$ 曲线族; 并由 $P-\epsilon N$ 曲线对某发动机高压涡轮盘进行了低循环疲劳寿命可靠性分析, 获得了置信水平分别为 0.5 0.9 0.95 时的轮盘概率寿命, 对应置信度 0.95 可靠度 0.998 7 的寿命与真实涡轮盘疲劳试验得到的轮盘技术寿命较为接近。

分析过程验证了 $P-\epsilon N$ 曲线整体推断方法的有效性, 得到的轮盘材料 $P-\epsilon N$ 曲线满足一定的精度要求, 能够为发动机涡轮盘的疲劳可靠性设计、寿命评估提供科学依据。通过 $P-\epsilon N$ 曲线对涡轮盘进行概率寿命估计, 简单易行、节约计算和试验成本, 适合设计阶段的寿命可靠性分析和涡轮盘技术寿命的初步估算。

参考文献:

[1] 傅惠民, 刘成瑞. ϵN 曲线和 $P-\epsilon N$ 曲线整体推断方法 [J]. 航空动力学报, 2006, 21(6): 957~ 961.

[2] 傅惠民. 线性异方差回归分析 [J]. 航空学报, 1994, 15 (3).

[3] 黄志豪. 航空发动机设计用材料数据手册 [M]. 北京: 中国航空发动机总公司, 1990.

[4] 王卫国. 轮盘低循环疲劳寿命预测模型和试验评估方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.

[5] 龚梦贤, 古远兴, 王旅生. 某型发动机 I 级涡轮盘的技术寿命 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2000, 13(4): 22 ~ 26.

[6] 钱文学, 尹晓伟, 谢里阳, 等. 轮盘疲劳可靠性分析的 Monte-Carlo 数字仿真 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19 (2).

[7] 陆 山, 吕文林. 轮盘低周疲劳寿命可靠性分析新方法 [J]. 航空学报, 1997, 18(2): 135~ 138.

[8] 唐俊星, 陆 山. 某涡轮盘低循环疲劳概率寿命数值模拟 [J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 706~ 710.

(编辑: 郭振伶)